

Srđan Dvornik\*  
 Luko Milić\*\*  
 Joško Dvornik\*\*\*

ISSN 0469-6255  
 (206-212)

BRODSKO STROJARSTVO

# MODELIRANJE DINAMIČKIH UVJETA RADA BRODSKOGA PARNOG KOTLA

*Modelling of Dynamic Conditions of the  
 Functioning of Steam Boiler*

UDK 621.18

Izvorni znanstveni članak  
 Original scientific paper

## Sažetak

Svrha ovog rada jest pokazati uspješnost primjene sustavnodinamičkoga simulacijskog modeliranja (System Dynamics Modelling – Jay Forrester – MIT [1]) pri istraživanju dinamike ponašanja brodskeg parnog kotla, a sam rad dio je istraživanja pri izradbi magistarskog rada studenta Srđana Dvornika, dipl. ing. s Pomorskog fakulteta u Splitu.

U ovom će se radu predstaviti učinkovita primjena znanstvenih metoda istraživanja složenih dinamičkih sustava pod nazivom kvalitativna i kvantitativna simulacijska metodologija Sustavne dinamike, koja će omogućiti izradu i uporabu većeg broja i vrsta simulacijskih modela promatranoga realiteta, te konačno omogućiti kontinuiranu kompjutorsku simulaciju, što će znatno pridonijeti stjecanju novih spoznaja o nelinearnoj prirodi dinamike ponašanja brodskih parnih kotlova u procesu dizajniranja i edukacije.

Brodski parni kotao bit će predstavljen u POWERSIM simulacijskom jeziku, i to mentalno-verbalnim, strukturnim i matematičko-kompjutorskim modelima.

**Ključne riječi:** brodski parni kotao, simulacijsko modeliranje, sustavna dinamika, kontinuirana i diskretna simulacija.

## Summary

The goal of this paper is to show a successful application of a system dynamics simulation modelling – Jay Forrester – MIT on investigation of the dynamics of the behavior of steam boiler, and the paper itself is a part of the research accompanying Master of Science Thesis carried out by Srđan Dvornik, B. Sc., Maritime Faculty, Split.

This paper will show efficient application of scientific methods of research of complex dynamic systems called quality and quantity simulation methodology of system dynamics which will enable us to make and apply various types of simulation models of the reality which was observed, and finally to enable continuous computer simulation which will considerably contribute to our acquiring of new knowledge about non – linear nature of dynamics of ship's steam boilers in the process of design and education.

Vessel's steam boiler will be represented in POWERSIM simulation language by means of mental – verbal, structural and mathematics – computer models.

**Key words:** ship's steam boiler, simulation modelling, systematic dynamics, continuous and discrete simulation.

\* Srđan Dvornik, dipl. ing., student poslijediplomant, Pomorski fakultet Split

\*\* dr. sc. Luko Milić, red. prof., Sveučilište u Dubrovniku

\*\*\* dr. sc. Joško Dvornik, dipl. ing., Pomorski fakultet Split

## 1. Simulacijsko modeliranje brodskoga parnog kotla

### Simulation Model of Vessel's Steam Boiler

#### 1.1. Matematički model brodskoga parnog kotla

##### Mathematic Model of Vessel's Boiler

Termodinamičko ponašanje parnoga kotla može se (prema [10]) proučavati tako da se on promatra kao toplinsko-kapacitivna cjelina sastavljena od sljedećeg niza toplinskih kapacitivnih dijelova:

- metalni dijelovi kotla,
- ekonomajzeri,
- količina vode u kotlu i cijevima,
- količina suhozasićene i pregrijane pare,
- parni pregrijač.

Kotao se može smatrati kao jedan homogeni uređaj, to jest kao toplinski akumulator, homogeni toplinski kapacitet. Jednadžbe toplinske bilance takva toplinskog akumulatora (kapaciteta) navode nas na determiniranje jednadžbe kotla po razini vode u kotlu.

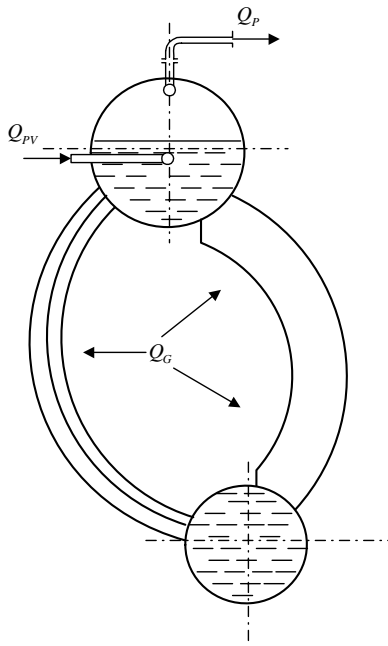
Da bi se dobile jednadžbe dinamike ponašanja kotla, potrebno je promatrati samo njegov parovodni dio (sl. 1.).

U parovodni trakt dovodi se:

1. toplinska snaga goriva koje se dovodi u plamenik kotla,  $Q_G$  [kJ/h],
2. toplinska snaga napojne vode koja se dovodi u kotao  $Q_{PV}$  [kJ/h],

a odvodi se:

3. toplinska snaga pare koja se odvodi iz kotla  $Q_P$  [kJ/h].



Sl. 1. Prikaz parnog kotla s prirodnom cirkulacijom

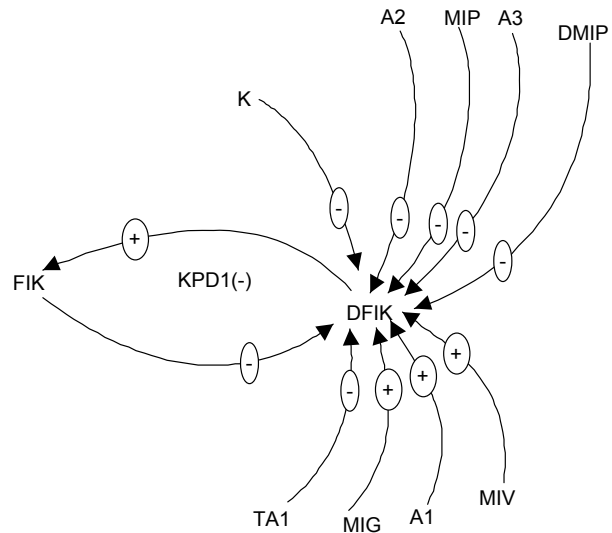
Fig. 1. Scheme of steam boiler with natural circulation

Sustavnodinamički matematički model brodskoga parnog kotla definira se eksplicitnim oblikom diferencijalnih jednadžba (prema [10]).

#### 1.2. Sustavnodinamički strukturni modeli brodskoga parnog kotla

##### System – Dynamic Structural Model of Vessel's Steam Boiler

Na temelju navedenih mentalno-verbalnih modela moguće je izraditi strukturne dijagrame za brodski parni kotao, koji su prikazani na slikama 2., 3. i 4.



Sl. 2. Strukturni model brodskoga parnog kotla – po tlaku pare

Fig. 2. structural model of vessel's steam boiler according the level of steam

gdje je:

FIK - relativno stanje tlaka pare u parnom kotlu,

TA1 - vremenska konstanta parnog kotla po tlaku pare [s],

K - koeficijent samoregulacije parnog kotla,

MIG - relativna promjena položaja ventila za gorivo,

MIV - relativna promjena položaja ventila za napojnu vodu,

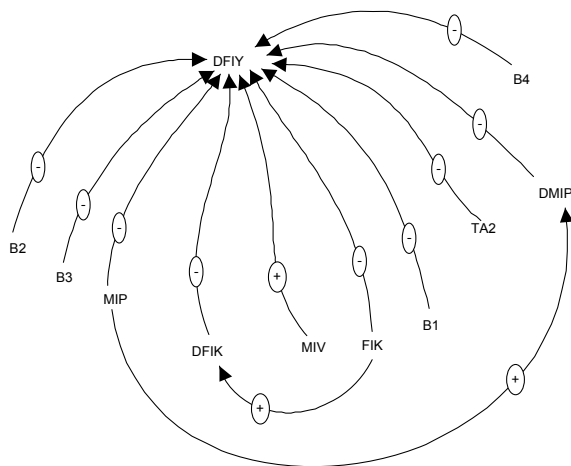
DFIK - brzina promjene relativnog prirasta tlaka pare u kotlu,

DMIP - brzina relativne promjene položaja ventila za odvod pare,

A1, A2, A3 - koeficijenti parnog kotla po tlaku pare.

U promatranom sustavu egzistira krug povratnoga djelovanja (KPD1).

KPD1(-): FIK => (-) DFIK => (+) DFIK => (+) FIK; koji ima samoregulirajući dinamički karakter (-) jer je zbroj negativnih predznaka neparan broj.



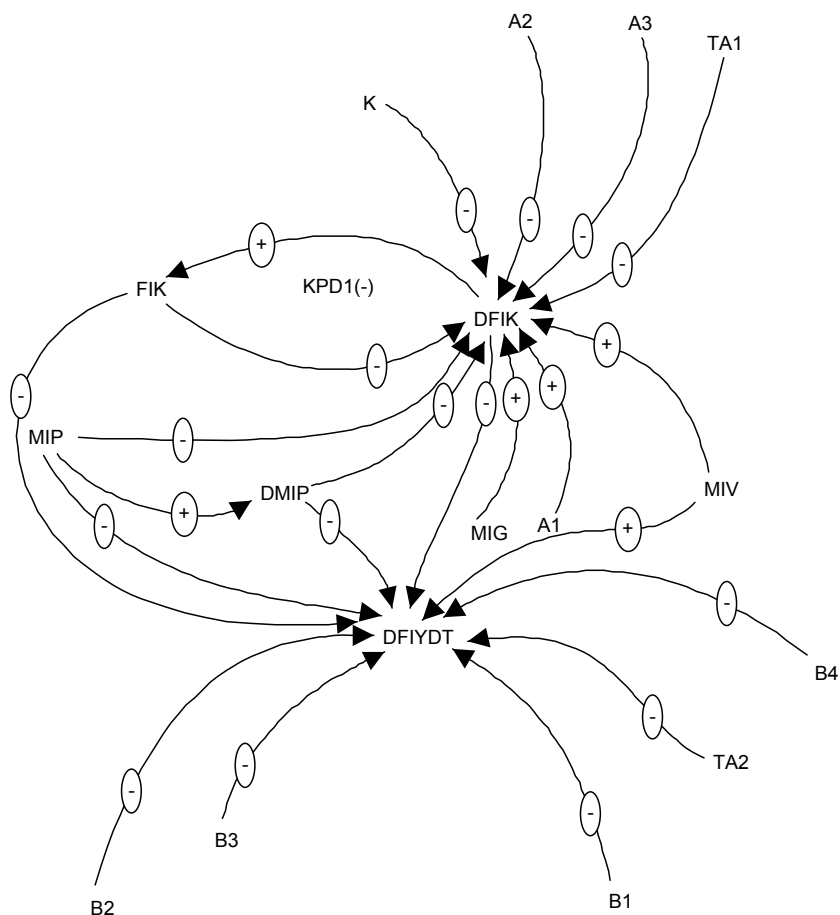
SI. 3. Strukturni model brodskoga parnog kotla – po razini vode

*Fig. 3. Structural model of vessel's steam boiler according the level of the water*

gdje je:

- FIK - relativno stanje tlaka pare u parnom kotlu,
- TA2 - vremenska konstanta parnog kotla po razini vode [s],
- MIV - relativna promjena položaja ventila za napojnu vodu,
- MIP - relativna promjena položaja ventila za odvod pare,
- DFIK - brzina promjene relativnog prirasta tlaka pare u kotlu,
- DMIP - brzina relativne promjene položaja ventila za odvod pare,
- B1-4 - koeficijenti parnog kotla po razini vode.

U promatranom sustavu ne egzistira krug povratnog djelovanja KPD-a jer dinamički proces ponašanja parnoga kotla s prirodnom cirkulacijom po razini vode nema svojstvo samoregulacije.



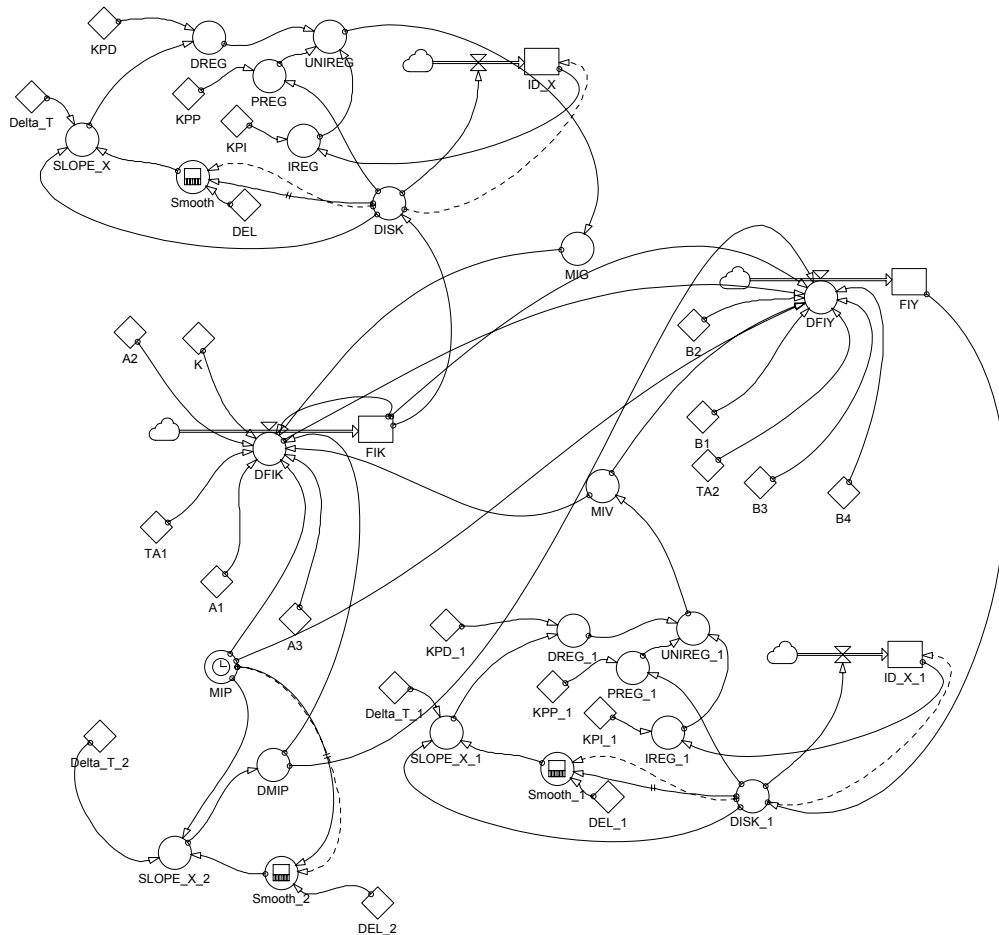
SI. 4. Globalni strukturni model brodskoga parnog kotla

*Fig. 4. Global structural model of a vessel's steam boiler*

### 1.3. Sustavnodinamički dijagram toka broskoga parnog kotla

#### System – Dynamic Diagram of the Flow of the Vessel's Steam Boiler

Na temelju izrađenih mentalno-verbalnih i strukturnih modela izvodi se dijagram toka broskoga parnog kotla u POWERSIM simulacijskom jeziku (prema [5]).



Sl. 5. Globalni dijagram toka broskoga parnog kotla s ugrađenim PID-regulatorima  
Fig. 5. Global diagram of the flow of vessel's steam boiler with PID regulators installed

## 2. Istraživanje dinamike ponašanja rada broskoga parnog kotla u uvjetima opterećenja

### Research of the Dynamics of the Behaviour of the functioning of Vessel's Steam Boiler when Overloaded

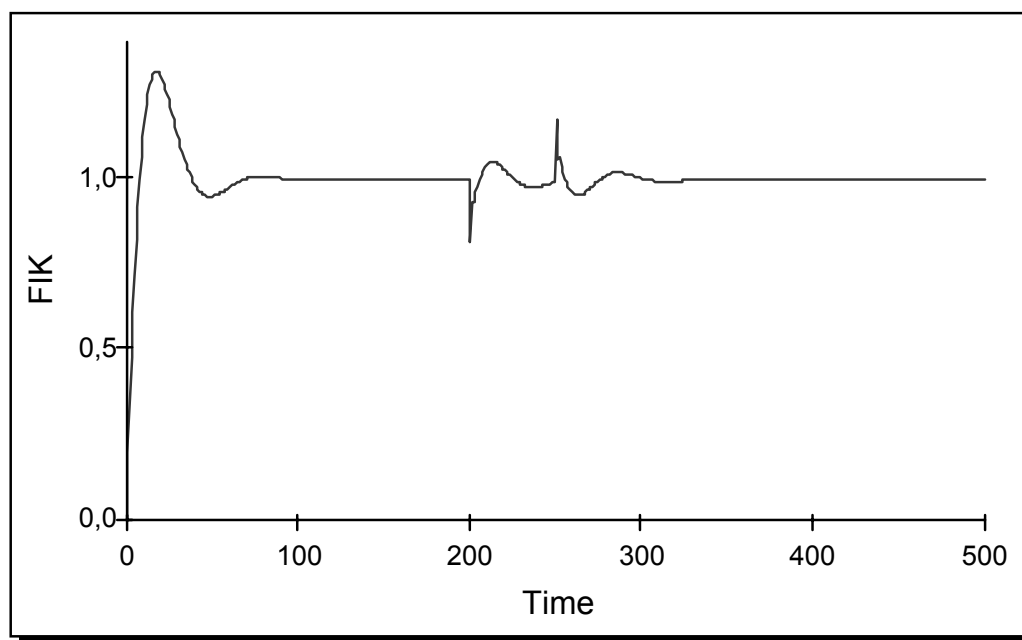
Nakon što smo izradili sustavnodinamičke kvalitativne i kvantitativne simulacijske modele, u nekom od simulacijskih paketa, a najčešće je to DYNAMO [2] ili POWERSIM [5], simuliramo sva moguća pogonska stanja sustava, i to laboratorijski.

Nakon što inženjer, projektant ili pak student obavi dostatan broj eksperimenata, to jest scenarija, te dobije uvid u dinamiku ponašanja sustava metodom heurističke optimizacije, može provoditi optimizaciju bilo kojih parametara u samom sustavu. Naravno, sve uz pretpostavku da je model validan.

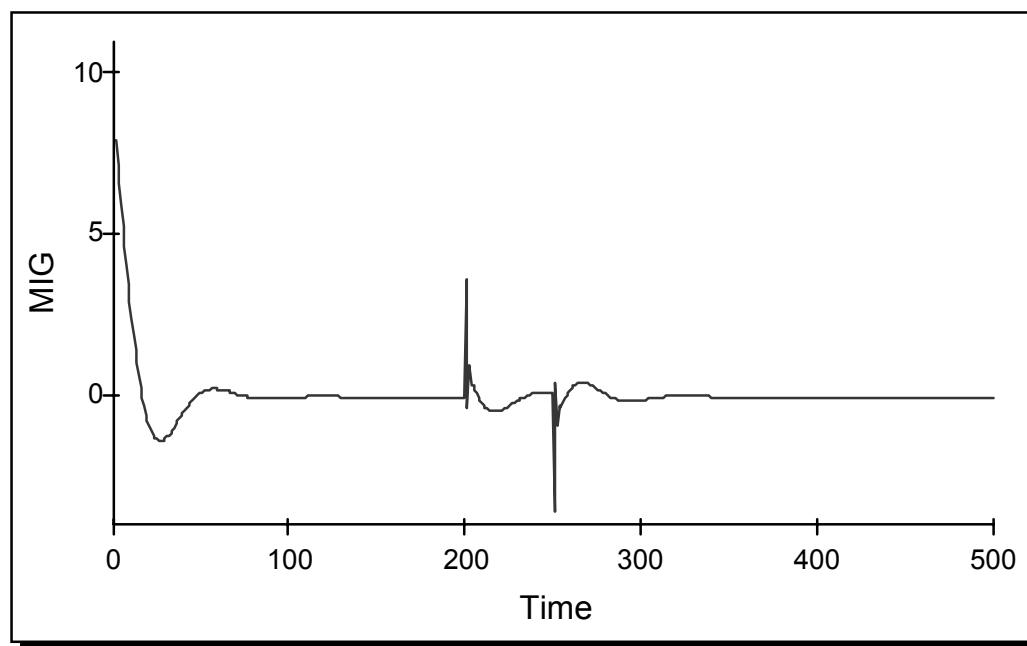
U scenariju koji ćemo predstaviti prikazat će se simulacijski model broskoga parnog kotla po tlaku pare i razini vode s ugrađenim dvama PID-regulatorima.

1. Potrošnja pare determinirana je impulsnom funkcijom koja traje 50 s, što znači od 200 do 250 sekunda, te je MIP = 0, FIK = 0, FIY = 0,9999 u početnom trenutku TIME = 0.
2. Dovod goriva MIG determiniran je kao izlaz iz PID-regulatora na kojega ulaz dolazi diskrepancija tlaka pare (1-FIK), i analogno tomu dovod vode MIV je izlaz iz drugoga PID-regulatora, kojemu je ulaz diskrepancija (1-FIY).
3. Ostali parametri broskoga parnog kotla jednaki su nominalnim iznosima.

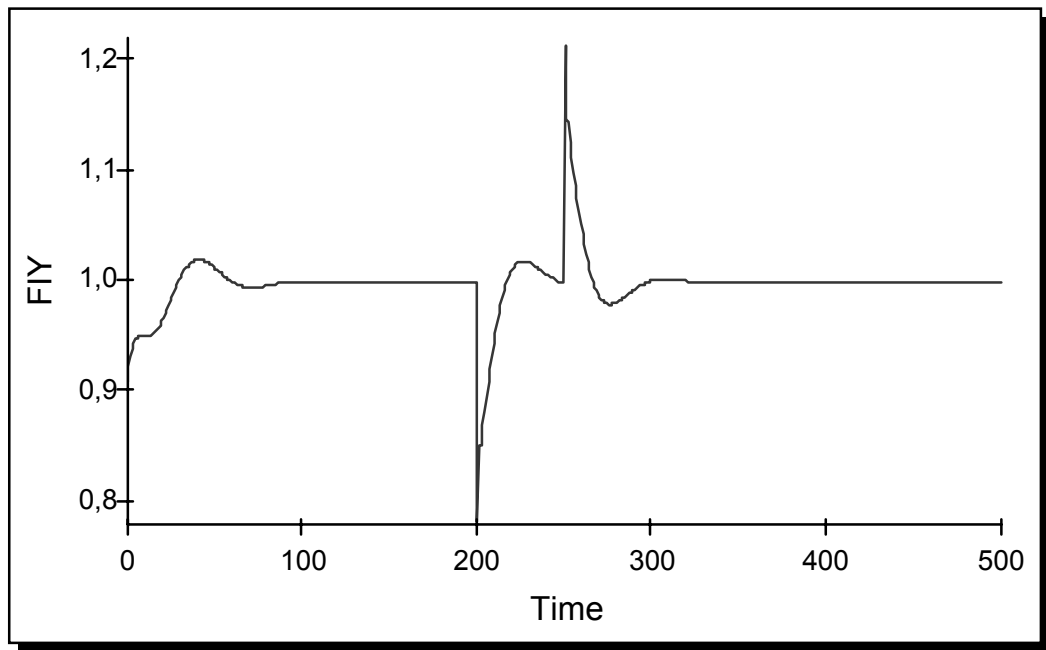
Grafički rezultati simulacije predočeni su na slikama 6.-9.



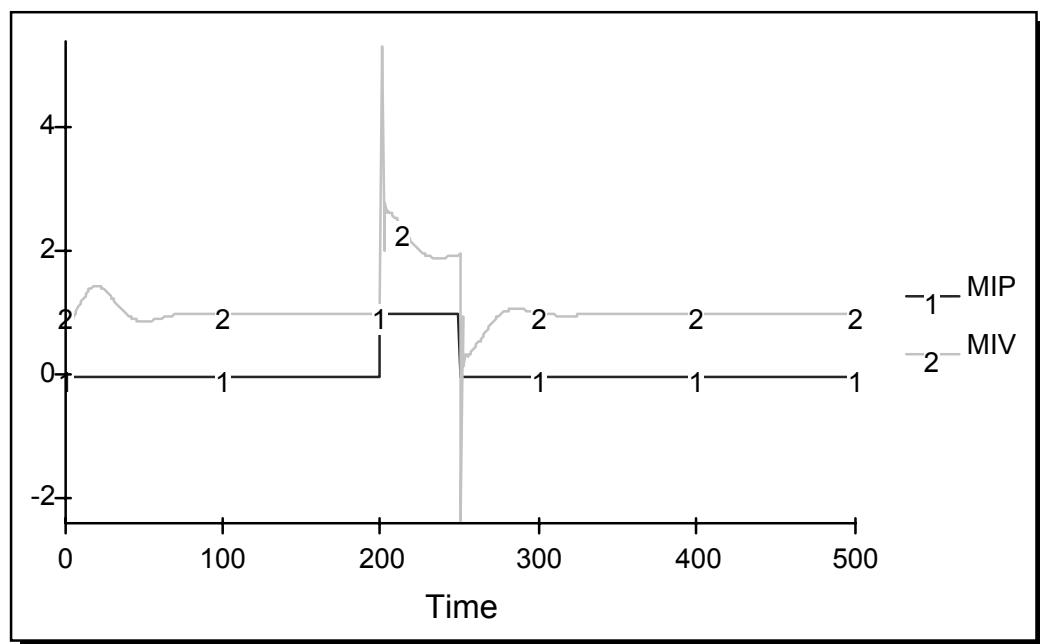
SI. 6. Relativno stanje tlaka pare u parnom kotlu  
*Figure 6. Relative condition of the pressure of the steam in the steam boiler*



SI. 7. Relativna promjena položaja ventila za gorivo  
*Fig. 7. Relative change in the position of the valve of the fuel*



SI. 8. Relativno stanje razine vode u parnom kotlu

*Fig. 8. Relative water level in steam boiler*

SI. 9. Relativna promjena položaja ventila za napojnu vodu i relativna promjena položaja ventila za odvod pare

*Fig. 9. Relative change in the position of the valve of the supply water and relative change of the position of the valve of the exhaust vapour*

Iz dobivenih rezultata simulacije moguće je uočiti da model pokazuje stvarnu dinamiku ponašanja i da uporaba PID-regulatora, uz pravilan odabir vrijednosti

koeficijenata, daje kvalitetnije izgladivanje, ali i prigušenje prijelaznih pojava varijabla FIK i FIY.

### 3. Zaključak

#### Conclusion

Sustavna je dinamika takva znanstvena metodologija koja omogućuje simulacije najsloženijih sustava. U pokazanom primjeru metodologija očito pokazuje visoku kvalitetu simulacija složenih dinamičkih sustava, te daje priliku svakomu zainteresiranom studentu ili inženjeru da s pomoću iste metodologije modelira, optimira i simulira bilo koji scenarij postojećih realiteta.

Nadalje, korisnici koji se koriste ovom metodologijom simuliranja kontinuiranih modela na digitalnom računalu, otvaraju sebi mogućnost stjecanja najnovijih znanja o ponašanju dinamičkih sustava. Metodologija je značajna i po tome što ne obuhvaća samo kompjutorski tip modeliranja već jasno determinira i mentalno, strukturno i matematičko modeliranje istih realiteta sustava.

U ovoj kratkoj prezentaciji daju se svi podatci potrebni jednomu stručnjaku i mogućnost prikupljanja dodatnih znanja o istom sustavu na brz, znanstveno utemeljen način istraživanja kompleksnoga sustava.

Što znači:

*Ne simulirajte dinamiku ponašanja složenih sustava na temelju istraživanja tzv. crne kutije, jer je praksa educiranja i dizajniranja složenih sustava potvrdila da je neusporedivo kvalitetnije simulirati s istraživačkim pristupom tzv. bijele kutije, to jest sustavnodinamičkom metodologijom.*

Autori

### Literatura

#### References

- [1] Jay W. Forrester, *Principles of Systems*, MIT Press, Cambridge Massachusetts, USA, 1973/1971
- [2] George P. Richardson and Aleksander L., *Introduction to System Dynamics Modelling with Dynamo*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 1981
- [3] A. Munitic, *Computer Simulation with Help of System Dynamics*, Croatia, BIS Split, p. 297, 1989
- [4] J. Šretner, *Brodski parni kotlovi*, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb, 1975.
- [5] H. Byrknes, *Run-Time User's Guide and Reference Manual*, Powersim 2.5, Powersim Corporation, Powersim AS, 12007 Sunrise Valley Drive, Reston Virginia 22091 USA
- [6] S. Šneller, *Pogon broda I – generatori pare*, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 1996.
- [7] L. I. Isakov, L. I. Kutljin, *Kompleksnaja avtomatizacija sudovljih dizeljih i gazoturbinljih ustanovok*, Leningrad, Sudostreonne, 1984.
- [8] G. F. Suprun, *Sintezsistem elektroenergetiki sudov*, Leningrad, Sudostroenie, 1972.
- [9] A. Hind, *Automation in merchant ships*, London, 1968
- [10] R. A. Nalepin, O. P. Demeenko, *Avtomatizacija sudovljih energetskih ustanovok*, Leningrad, Sudostroenne, 1975.
- [11] Z. Prelec, *Brodski generatori pare*, Školska knjiga, Zagreb, 1990.

Rukopis primljen: 25. 10. 2006.

